

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОВЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НАНОВКЛЮЧЕНИЙ ЖИДКОГО СВИНЦА НА ЗАКРЕПЛЕННЫХ ДИСЛОКАЦИЯХ В АЛЮМИНИИ

С.И. Прокофьев¹, Э. Йонсон^{2,3}

¹Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки
“Институт Физики Твёрдого Тела Российской Академии Наук”
ул. Академика Осипьяна 2, Черноголовка, Российская Федерация;
E-mail: prokof@issp.ac.ru

²Center for Quantum Devices, NBI, University of Copenhagen
Universitetsparken 5, Copenhagen, DK-2100 Denmark

³Dept. of Wind Energy, Technical University of Denmark, Risø Campus
Roskilde, DK-4000 Denmark

ANALYSIS OF THE TIME DEPENDENCES OF THERMAL OSCILLATIONS OF LIQUID LEAD NANOINCLUSIONS ON FIXED DISLOCATIONS IN ALUMINUM

S.I. Prokofjev¹, E. Johnson^{2,3}

¹Federal State Budget Institution of Science “Institute of Solid State Physics of the Russian Academy
of Sciences”,

2 Akademika Ossipyana str., Chernogolovka, Russian Federation;
E-mail: prokof@issp.ac.ru

²Center for Quantum Devices, NBI, University of Copenhagen
Universitetsparken 5, Copenhagen, DK-2100 Denmark

³Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, Risø Campus
Roskilde, DK-4000 Denmark

Фазовые частотные спектры зависимостей осцилляций нановключений от времени, полученных с помощью in situ ПЭМ, указывают на синхронизацию осцилляций в ансамблях нановключений жидкого Pb на закрепленных дислокациях в алюминии.

The phase frequency spectra of the dependences of nanoinclusions oscillations on time obtained by in situ TEM point to the synchronization of oscillations in the ensembles of liquid Pb nanoinclusions on fixed dislocations in aluminum.

Введение

In-situ ПЭМ наблюдения позволяют количественно изучать кинетику и динамику теплового движения нановключений жидкого Pb на закрепленной дислокации в алюминии [1-3]. В частности, нами было показано, что все нановключения на дислокации взаимодействуют друг с другом и с закрепленными концами дислокации [4-6], что приводит к их хаотическим осцилляциям вблизи линии дислокации [2, 7]. Были получены эффективные потенциалы их взаимодействия [5, 6]. Таким образом, включения на одной дислокации являются связанными хаотическими осцилляторами, что позволяет ожидать их пространственно-коррелированное движение, что было действительно показано в [5, 6, 8-10]. Так как осцилляции каждого из включений приводят к осцилляциям связанных с ним краев потенциальных ям, что вносит вклад в осцилляции находящихся в них соседних включений, то можно ожидать временные корреляции их осцилляций и возникновения общих колебательных мод.

В данной работе качественно рассматриваются и сравниваются полученные с помощью FFT фазовые частотные спектры зависимостей осцилляций от времени включений из разных ансамблей на закрепленных дислокациях.

Экспериментальная процедура

Исследования проводились на фольгах, приготовленных из лент сплавов Al содержащих 0.5 и 0.65 ат. % Pb, которые были получены методом быстрого затвердевания из жидкого состояния от температуры выше области несмешиваемости [11]. Микроструктура, состоящая из почти чистой поликристаллической Al матрицы и внедренных в нее нановключений почти чистого Pb [11], получалась с помощью стабилизирующего отжига. In-situ ПЭМ наблюдения теплового движения нановключений на закрепленной дислокации проводились с помощью нагревательного столика. Температура образцов контролировалась с точностью около 1°C, а ее абсолютное значение определялось с погрешностью около 5°C. Наблюдения записывались на видео. На каждом видеокadre определялись координаты центров включений. Из этих измерений, после вычитания дрейфа образца в процессе наблюдений, определялись координаты точек проекции траектории включений на плоскость изображения. Также определялись размеры нановключений и длины проекций дислокаций.

Основные результаты

Ранее исследования продольных (Z) тепловых осцилляций в ансамблях 2 [6], 4 [9] и 12 [8, 10] включений на дислокации показали, что во всех этих ансамблях осцилляции всех включений пространственно коррелированы между собой [6, 8-10]. Кроме того, коррелограммы (см. [9]) указывают на наличие временных корреляций тепловых осцилляций включений в этих ансамблях.

На Рис. 1, показаны частотные спектры фазы $\phi(\nu) = -\arctg[\text{Im}(\nu)/\text{Re}(\nu)]$ зависимостей $z(t)$ включений, представляющих эти же ансамбли. Здесь ν – частота, а $\text{Re}(\nu)$ и $\text{Im}(\nu)$ – действительная и мнимая части Фурье-представления $z(t)$. При получении FFT спектров использовалось окно Меннинга (Menning). Точнее, на Рис. 1 показаны развертки этих спектров в дискретном виде, т.к. они позволяют выявлять визуально наличие упорядочения в них.

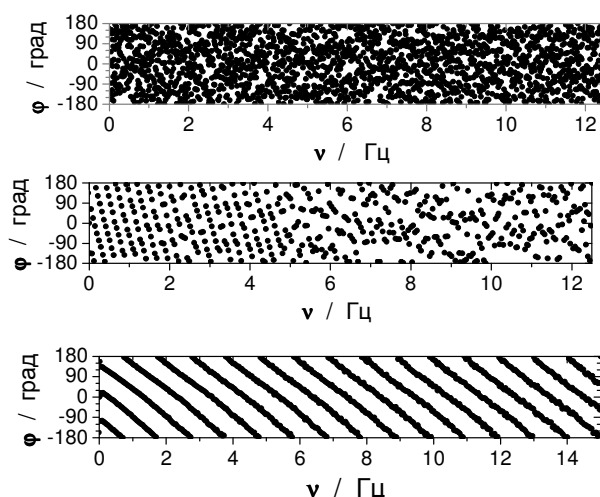


Рис. 1 - Фазовые частотные спектры продольных тепловых осцилляций включений в ансамблях (а) 2, (б) 4 и (в) 12 включений на дислокации, полученные с помощью FFT

В спектре $\phi(\nu)$ на Рис. 1(а) (2 включения на дислокации при 447°C, 2687 точек траектории) точки спектра визуально хаотически заполняют всю площадь графика. В спектре на Рис. 1(б) (4 включения на дислокации при 485°C, 560 точек траектории) можно видеть, что при низких частотах в спектре $\phi(\nu)$ присутствуют приблизительно линейные элементы, повторяющиеся с одинаковым шагом по частоте, с увеличением частоты они хаотизируются.

Спектр на Рис. 1(в) (12 включений на дислокации при 441°C, 1355 точек траектории) характеризуется почти совершенным периодическим узором, что указывает на почти гармонические осцилляции. Характер спектров $\varphi(\nu)$ на этих графиках и величина периода (на Рис. 1(б) и Рис. 1(в)) сохраняются для спектров всех других включений каждого ансамбля. Это может указывать на наличие общих колебательных мод тепловых осцилляций включений в интервале частот, где они наблюдаются. Возможно, эти моды связаны с собственными колебаниями закрепленной дислокации, инициированными тепловыми флуктуациями.

Беспорядок в спектре на Рис. 1(а), вероятно, связан с более слабым взаимодействием между включениями по сравнению с другими ансамблями, что может быть связано с большим средним расстоянием между ними. Возможно, на силу взаимодействия между включениями также оказывает влияние число включений в ансамбле [12], которое в случае (а) равно 2. Отметим, что, как показано в [10], значительное повышение температуры не разрушает узор в частотных спектрах, см. Рис. 1(в), хотя несколько усиливает хаотизацию линейных элементов в них.

Пространственно коррелированные осцилляции всех включений, временные корреляции и наличие общих мод в их осцилляциях указывает на некоторую степень синхронизации [12]. Причем, ожидаемая степень синхронизации в случае (а) ниже, чем в случаях (б) и (в).

Резюме

Продольные тепловые осцилляции включений в ансамблях 2, 4 и 12 нановключений жидкого Рb на одной закрепленной дислокации в Al при 447°C, 485°C и 441°C, соответственно, изучались in-situ с помощью ПЭМ. Полученные с помощью FFT из зависимостей координат положений включений на линии дислокации от времени, спектры $\varphi(\nu)$ указывают на наличие общих колебательных мод.

Ранее на этих же ансамблях нановключений было показано, что тепловые осцилляции включений на одной закрепленной дислокации, в среднем, являются пространственно коррелированными и носят коллективный характер. Также были получены указания на временные корреляции тепловых осцилляций включений в этих ансамблях.

Все эти данные говорят о том, что хаотические осцилляции включений в изучавшихся ансамблях 2, 4 и 12 включений в какой-то степени синхронизированы. Меньшая степень синхронизации тепловых осцилляций в случае двух включений, вероятно, связана с более слабым взаимодействием между ними по сравнению с взаимодействием в ансамблях из 4 и 12 включений.

Список использованных источников:

1. *Johnson E., Andersen J.S., Levinsen M.T., Steenstrup, S., Prokofjev, S., Zhilin, V., Dahmen, U., Radetic, T. and Turner, J.H.*, Mater. Sci. Eng. A 2004, 375-377, 951.
 2. *Prokofjev, S., Zhilin, V., Johnson, E., Levinsen, M.T., Dahmen, U.*, Def. Diff. Forum 2005, 237-240, 1072; *Прокофьев С.И., Жилин В.М., Johnson E., Dahmen U.*, Изв. РАН: Сер. Физ. 2007, 71, 1705.
 3. *Prokofjev S. I., Zhilin V. M., Johnson E., Dahmen U.*, Def. Diff. Forum 2007, 264, 55.
 4. *Prokofjev S.I., Johnson E., Zhilin V.M., Dahmen U.*, Adv. Sci. Technol., 2006, 46, 98.
 5. *Прокофьев С.И., Йонсон Э., Дамен У.*, Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'12) Труды Международной научно-технической конференции. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2012, 104.
 6. *Prokofjev S.I., Johnson E.*, J. Phys. Commun., 2017, 1(5), 055001.
 7. *Johnson E., Prokofjev S., Zhilin V., Dahmen U.*, Z. Metallk. 2005, 96, 1171.
 8. *Прокофьев С.И., Йонсон Э., Дамен У.*, XXIX Симпозиум «Современная химическая физика», 17-28 сентября 2017 г., Туапсе, 229.
 9. *Прокофьев С.И., Йонсон Э.*, XXII Международный междисциплинарный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах (ОМА-22)», НИИ Физики ЮФУ, 2019, 143.
 10. *Прокофьев, С.И., Йонсон Э., Дамен У.*, XXXI Симпозиум «Современная химическая физика», 16-25 сентября 2019 г., Туапсе, 234.
 11. *McAlister A.J.*, Bull. Alloy Phase Diagrams 1984, 5, 69.
- Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация, фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.